

Oportunidades y amenazas de la nanotecnología para la salud, los alimentos, la agricultura y el ambiente

Ricardo Molins¹

Resumen

La nanotecnología, un campo relativamente nuevo de investigación y elaboración de materiales industriales con base en la creación de nuevas clases de estructuras moleculares originales, muestra rápidos avances que prometen cambiar radicalmente o afectar muchas esferas de la ciencia y la tecnología. Además, ofrece innumerables posibilidades para el progreso humano, mediante la creación de varios tipos de nanomateriales aplicables en revolucionarios tratamientos médicos, en la investigación agrícola y métodos de diagnóstico de inocuidad alimentaria, en procedimientos de restauración ambiental, aplicaciones energéticas como el revestimiento de células solares, incluso en productos cotidianos de gran volumen como los cosméticos, tejidos repelentes de la suciedad y pintura auto-lavable. No obstante, es esencial y urgente evaluar no sólo los beneficios, sino también los posibles riesgos que plantean las nanopartículas y acordar medidas efectivas mediante criterios reguladores adecuados.

¹ Director de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad de Alimentos del IICA, ricardo.molins@iica.int



Palabras clave: nanotecnología, nanomateriales, agricultura, ambiente, nanopartículas, progreso, salud, efectos...

¿Qué son la nanotecnología y los nanomateriales?

La nanotecnología –término antepuesto por el sufijo nano, que proviene del griego y significa diminuto– consiste en manipular materiales a niveles atómicos y moleculares para crear nuevas estructuras moleculares conocidas como “nanomateriales”, las cuales poseen características únicas y nuevas diferentes a las de los materiales originales de los que se derivan. Estos materiales pertenecen a varias clases que varían entre sí en numerosas características básicas como la persistencia, reactividad y comportamiento en los sistemas biológicos, a tal punto que se hace imposible formular generalizaciones sobre sus propiedades.

La nanotecnología promete cambiar el mundo, tal como lo conocemos, por ejemplo, desde una pintura para automóviles que se limpia a sí misma y ropas que nunca absorben suciedad u olores, a sistemas de administración de medicamentos capaces de focalizarse en órganos específicos. Los nanomateriales ya están siendo producidos y comercializados y su uso en una infinidad de aplicaciones es sólo cuestión de tiempo. La nanotecnología está llevando la miniaturización a un nivel extremo, a los módulos elementales de la naturaleza

y al cambio de los comportamientos físicos y químicos de los materiales. La confluencia de la nanotecnología con la biología molecular y la tecnología de la información y su combinación con avances revolucionarios en la instrumentación, están abriendo una puerta a una nueva era industrial que bordea la ciencia-ficción. En reconocimiento del enorme potencial de este nuevo campo, muchos países están invirtiendo fuertemente en la investigación nanotecnológica en busca de una posición competitiva (Thayer 2002). Por ejemplo, en Estados Unidos, se creó la Iniciativa Nacional de Nanotecnología para promover este nuevo campo (NNI 2007).

Para poner en contexto los nanomateriales, piénsese que el tamaño de los átomos oscila entre 0,1 y 1 nanómetro (nm)², mientras que las moléculas simples pueden estar entre 1 y 10 nm; los virus, entre unos 10 y 100 nm, y las bacterias, entre 1 y 10 micrómetros (µm) (Warad y Dutta 2007). Las partículas menores de 50 nm siguen la física cuántica, en tanto a las partículas más grandes se aplican las leyes de la física clásica. A nivel de nanopartícula, pueden ocurrir cambios



La nanotecnología promete cambiar el mundo, tal como lo conocemos, por ejemplo, desde una pintura para automóviles que se limpia a sí misma y ropas que nunca absorben suciedad u olores, a sistemas de administración de medicamentos capaces de focalizarse en órganos específicos.

² Un nanómetro equivale a un millonésimo de milímetro.

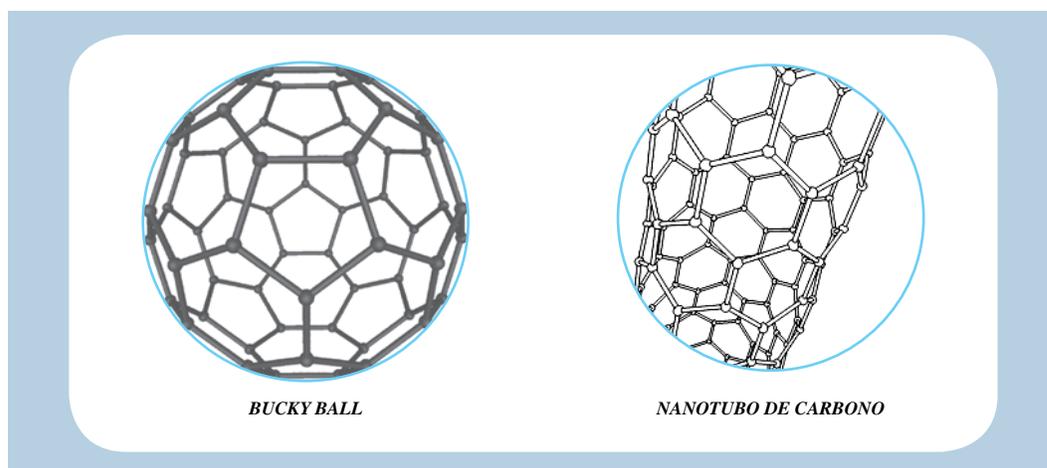
► *En contraste con la ciencia tradicional de los materiales, que se basa sobre todo en la descomposición de materiales en partículas para regenerarlos o para crear nuevos materiales, la nanotecnología construye materiales mediante auto-ensamblaje, a partir de los átomos.*

de las propiedades eléctricas, químicas, magnéticas, mecánicas o biológicas del material que lo diferencian del correspondiente en su forma normal, aunque sin cambios en su composición química. Los materiales pueden presentar características nuevas, realizadas, como la flexibilidad, fortaleza, conductividad, tensión superficial e inclusive el color cuando

las partículas son menores a los 100 nm. No obstante, también pueden aumentar en reactividad química debido a la mayor razón masa/superficie. Al estar más átomos expuestos al exterior, especialmente en el

caso de las nanopartículas cristalinas, están más sueltas entre sí y, por ende, son más proclives a reaccionar.

En contraste con la ciencia tradicional de los materiales, que se basa sobre todo en la descomposición de materiales en partículas para regenerarlos o para crear nuevos materiales, la nanotecnología construye materiales mediante auto-ensamblaje, a partir de los átomos. Se están creando materiales verdaderamente nuevos a través del diseño del ordenamiento de los átomos en nanoestructuras de diversos tipos. Las *bucky balls* o *fulerenos* (así denominados por su parecido con las esferas geodésicas de Buckminster Fuller) son estructuras diminutas con base en carbono configuradas de manera similar a una pelota de fútbol.



Se está produciendo otro tipo de nanoestructura, denominada "nanotubo," como un módulo elemental de fibras de carbono, altamente flexibles pero extraordinariamente resistentes. Los nanotubos son cilindros huecos con diámetros que oscilan entre 1 y 100 nm, en la nanoescala. Los nanotubos de carbono, uno de los pocos materiales de esta pequeñez que se

están produciendo en gran escala, presentan algunas propiedades singulares, como la alta conductividad, la gran capacidad de absorción molecular y una alta resistencia mecánica. Estas características de los nanotubos de carbono están sometiéndose a pruebas para su aplicación en esferas tan diversas como la nanoelectrónica, las comunicaciones ópticas, materiales para

la aeronáutica, diagnóstico de laboratorio y pilas electroquímicas.

La modificación de los materiales existentes también ofrece oportunidades aparentemente ilimitadas a la nanotecnología. Por ejemplo, se están produciendo nanopartículas que se usarán en aplicaciones tales como el vidrio o el plástico resistente al desgaste, o como aditivos en pinturas resistentes a la suciedad para automóviles o letreros de calles, edificios y superficies de células solares, así como en prendas de vestir que repelen la suciedad. Actualmente, las nanopartículas se están usando en aplicaciones tan diversas como la fabricación de superficies metálicas inalterables a la corrosión y cremas transparentes para bloquear los rayos del sol sobre la piel.

Oportunidades y promesas de la nanotecnología

La nanotecnología en la medicina

La nanotecnología ofrece enormes posibilidades para el avance de numerosas ciencias. Una de las aplicaciones más notorias y potencialmente más inmediatas y prometedoras de los nanomateriales es la del diagnóstico y el tratamiento médicos, y la prevención de enfermedades, como el cáncer. La vasta información generada por el proyecto del genoma humano trajo consigo progresos en el estudio genómico y proteómico del cáncer que, combinados con la nanotecnología, podrían revolucionar la oncología mediante la manipulación



de la base molecular de la enfermedad. Para ello, el Instituto Nacional de Cáncer de Estados Unidos (NCI) elaboró un *Plan de Nanotecnología del Cáncer (CNPlan)* y creó un grupo de trabajo, la Alianza para la Nanotecnología en el Cáncer, del NCI. Este vasto plan cubre las esferas de la prevención y control, detección precoz y estudio proteómico, diagnóstico iconográfico, terapéutica multifuncional y mejoramiento de la calidad de la atención del paciente oncológico (United States Department of Health and Human Services *et al.* 2004).

Las aplicaciones de la nanotecnología al diagnóstico *in vivo*, como la administración de agentes de contraste a las células cancerosas mediante nanodispositivos para la creación de imágenes por resonancia magnética, podrían permitir detectar la enfermedad en sus etapas más precoces.

Una de las aplicaciones más notorias y potencialmente más inmediatas y prometedoras de los nanomateriales es la del diagnóstico y el tratamiento médicos, y la prevención de enfermedades, como el cáncer. La vasta información generada por el proyecto del genoma humano trajo consigo progresos en el estudio genómico y proteómico del cáncer que, combinados con la nanotecnología, podrían revolucionar la oncología mediante la manipulación de la base molecular de la enfermedad.



La nanotecnología en la agricultura, los alimentos y el ambiente

Por su parte, para el diagnóstico *in vitro* ya se emplean *cantilevers* en nanoescala capaces de incrementar la sensibilidad de los métodos de detección hasta una simple molécula para marcadores del cáncer tales como algunas proteínas específicas.

Las denominadas *bucky balls*, por ejemplo, podrían recubrirse de anticuerpos específicos para algunos órganos o células del cuerpo humano, y rellenarse de compuestos farmacéuticos quimioterapéuticos o de sustancias terapéuticas. Una vez inyectadas en el cuerpo humano o animal, esas “pelotitas” actuarían como sistemas de administración focalizados que buscarían esos destinos para reunirse y administrar su contenido sólo en los órganos o células objetivo de los anticuerpos. Además, el mismo nanodispositivo administrador del medicamento podría transportar un agente de contraste indicador que permitiría confirmar la administración del medicamento mediante técnicas iconográficas (Hett 2004).

Otras estructuras de este tipo podrían ser también objeto de activación magnética para generar un calor localizado para destruir tumores mediante vibración de alta frecuencia. Las combinaciones de estas posibilidades dentro de un único dispositivo nanométrico dieron lugar al concepto de nanoclínica.

Dado que los dispositivos de escala nanométrica o los componentes en nanoescala de dispositivos de mayor tamaño son mucho más pequeños que las células de los humanos, los animales o las plantas, los mismos pueden ser utilizados para penetrar al interior de las células. Ello permitiría que los investigadores observaran y midieran el transporte de proteínas dentro de la célula, por ejemplo, y que midieran la expresión genética. Esta posibilidad abre todo un nuevo horizonte en la investigación en la salud y la agricultura, en áreas como la genética animal y de vegetales alimenticios, así como la conversión de desechos en energía (Thayer 2002; Joseph y Morrison 2006).

Un ejemplo de las posibilidades de las nanopartículas de penetrar las células es el de un nanoplaguicida –en proceso de creación conjunta entre institutos de investigación agrícola de México e India– que atacaría la película que recubre la semilla de las malezas. (Roach 2006b). Se impediría la germinación, con lo que se destruiría la semilla aunque estuviera profundamente enterrada, fuera del alcance del agricultor y de los plaguicidas convencionales, porque las partículas del suelo no podrán impedir la migración descendente de las minúsculas nanopartículas plaguicidas.



Se están investigando otras aplicaciones para la detección rápida, portátil y simultánea de bacterias patógenas como la *Salmonella* spp., *Escherichia coli* O157:H7 y la *Listeria monocytogenes* en los alimentos. Ya no será necesario enviar muestras del alimento a los laboratorios, porque los análisis se harían en el establecimiento agrícola, matadero o planta elaboradora o durante el transporte.

De acuerdo con los investigadores que trabajan en este método de análisis (Roach 2006a), en el proceso se emplean nanocables y anticuerpos, de modo que se pueden determinar simultáneamente la presencia y el tipo de contaminación, así como su concentración. Se asigna a cada nanocable un patrón reconocible de barras plateadas o doradas, del tipo de un código de barras minúsculo, y se depositan en una cinta. Luego se colocan anticuerpos contra bacterias o virus patógenos específicos en cada nanocable. Por ejemplo, el nanocable uno podría contener el anticuerpo contra la *Salmonella* y el nanocable dos, el de *E. coli*. Durante el uso, estas cintas se colocan sobre la carne u otro alimento y, en presencia de *Salmonella*, las células se unirán con el anticuerpo correspondiente en el nanocable uno.

La detección se posibilita empleando una solución fluorescente que contiene una multitud de anticuerpos. Luego, los

nanocables son expuestos al *cocktail* de anticuerpos fluorescentes y los agentes patógenos, ya unidos con los anticuerpos en los nanocables, también se unirán con los correspondientes anticuerpos fluorescentes, en lo que se conoce como "inmunoensayo tipo *sandwich*". Como cada nanocable es reconocible por sus bandas plateadas y doradas, un procesador electrónico podrá indicar al instante qué agentes patógenos están presentes y cuál es su concentración. De acuerdo con otro grupo de investigadores que trabajan en un sistema similar, el tiempo de detección podría ser de apenas 15 minutos (ElAmin 2006).

También se podrían utilizar nanopartículas que emitan luz ligadas a anticuerpos para realizar ensayos que permitan detectar simultáneamente múltiples sustancias químicas, lo que podría tener aplicaciones invaluable en toxicología, como la detección y cuantificación de residuos de diferentes plaguicidas (Thayer 2002; Joseph y Morrison 2006). Este tipo de ensayos tendrían un valor incalculable para determinar la seguridad de los alimentos.

En la protección ambiental, la nanotecnología está permitiendo aplicaciones en fotocatalisis, un proceso en el que la luz fomenta una reacción entre compuestos como residuos de plaguicidas y el nanomaterial, sin que éste se consuma. Ese proceso sería útil en la descontaminación del agua para consumo humano y agrícola. Por ejemplo, se ha estudiado con éxito en diversos ámbitos la eliminación de aceites, agroquímicos y productos de desecho –inclusive de contaminantes biológicos como los virus– vía fotocatalisis, usando nanomateriales de óxido de titanio (TiO₂). En inocuidad de alimentos, la

fotocatálisis podría aplicarse en la superficie de las frutas y hortalizas frescas para eliminar los residuos de agroquímicos tóxicos y destruir las bacterias (Joseph y Morrison 2006).

En el área de producción y comercialización agrícolas, Warad y Dutta (en Thayer 2002) proponen con fundamento la futura aplicación de nanomateriales a diminutos códigos de barras. Estos códigos de barras invisibles serían sumamente útiles en la rotulación de frutas, hortalizas y numerosos productos agrícolas en el establecimiento, para su posterior rastreo electrónico a lo largo de la cadena alimentaria, hasta llegar al consumidor. Esos minúsculos códigos de barras serían totalmente imperceptibles, por lo que no plantearían ningún obstáculo y permitirían la lectura electrónica.

 *En la protección ambiental, la nanotecnología está permitiendo aplicaciones en fotocatalisis, un proceso en el que la luz fomenta una reacción entre compuestos como residuos de plaguicidas y el nanomaterial, sin que éste se consuma. Ese proceso sería útil en la descontaminación del agua para consumo humano y agrícola. En inocuidad de alimentos, la fotocatalisis podría aplicarse en la superficie de las frutas y hortalizas frescas para eliminar los residuos de agroquímicos tóxicos y destruir las bacterias (Joseph y Morrison 2006).*

Las amenazas: prácticamente se desconocen los posibles riesgos de los nanomateriales

¿Aceptará el público la nanotecnología? La experiencia con la energía atómica y la biotecnología agrícola ofrece lecciones importantes. En Estados Unidos, la reacción adversa del público a la energía nuclear ha obstaculizado su desarrollo, aunque es ampliamente utilizada en Europa y en el resto del mundo. Los expertos en comunicación de riesgos apuntaron a aspectos como la invisibilidad de la radiación y al hecho de que el cáncer es una “enfermedad terrible” para explicar su oposición a la energía atómica en ese país. Sin embargo, el hecho es que no se han construido nuevas plantas atómicas en décadas.

Por su parte, en Europa el público ha respondido negativamente a la biotecnología agrícola (aunque no al uso de la biotecnología en la producción de productos farmacéuticos y sustancias químicas). Si bien los productos de la nanotecnología ya están ingresando al mercado, en la imaginación popular hay numerosos elementos que crean percepciones negativas, como la ciencia-ficción y una película de terror en la que se describen unas partículas diminutas inexistentes que se reproducen por sí mismas.

Para sustituir las reacciones irracionales por actitudes racionales, es preciso generar información, no sólo sobre los beneficios, sino también acerca de los riesgos que pueden plantear las nanopartículas y convenir medidas efectivas de prevención mediante criterios regulatorios adecuados



También hemos aprendido del pasado que la participación de los interesados –la industria, el gobierno, los consumidores y la comunidad médica– es esencial para lograr las preguntas correctas, el intercambio de información, decisiones fundamentadas en la preocupación de todos los involucrados y que no se impongan al público sin su consentimiento.

(Michelson s.f., en línea) . También hemos aprendido del pasado que la participación de los interesados –la industria, el gobierno, los consumidores y la comunidad médica– es esencial para lograr las preguntas correctas, el intercambio de información, decisiones fundamentadas en la preocupación de todos los involucrados y que no se impongan al público sin su consentimiento.

Un punto de partida es empezar a comprender algunos de los riesgos posibles. No es mucho lo que se sabe. Sí sabemos que algunas de las características de los nanomateriales que los hacen apetecibles en diversas aplicaciones podrían también plantear algunos problemas nuevos de seguridad. Por ejemplo, a raíz de las variaciones de la reactividad a nivel nanométrico, ya no aplica el conocido comportamiento toxicológico de materiales comunes como el carbono, descrito en las publicaciones sobre seguridad de los materiales en su forma a granel (Colvin 2003). Además, a diferencia de nanopartículas naturales como las de sal en los aerosoles marinos, que son solubles,

y de las nanopartículas insolubles pero efímeras generadas por combustión, que tienen tendencia a agregarse para formar partículas más grandes, las nanopartículas manufacturadas a menudo están deliberadamente recubiertas por sustancias que impiden la aglomeración. Esta película con frecuencia es necesaria porque el pequeño tamaño de las nanopartículas fomentaría una fuerte agregación una vez que son retiradas de la etapa líquida o de la etapa de gas comprimido empleadas para fabricarlas. De manera que esas partículas recubiertas podrían permanecer en su forma original, altamente reactiva, en el medio ambiente o en el cuerpo humano por un período indeterminado.

Dado el tamaño extremadamente diminuto de las nanopartículas manufacturadas y en especial habida cuenta de los tratamientos de su superficie para impedir que se aglomeren para formar partículas más grandes, es probable que muchos nanomateriales que sean liberados en el ambiente permanezcan en él indefinidamente (Colvin 2004). Se ha demostrado que el recubrimiento de la superficie pro-



El diminuto tamaño de las nanopartículas les permitiría entrar al torrente sanguíneo por los pulmones tras la inhalación, al tubo digestivo si son ingeridas e incluso a través de la piel si son en ella aplicadas o depositadas, como ocurre con las cremas para protección contra el sol ya comercializadas.

duce nanopartículas altamente móviles, sea en el aire, el suelo o el agua. Las nanopartículas contenidas en el aire no tienden a reposar en las superficies y pueden no ser retenidas con los filtros de los respiradores comunes. Una vez depositadas en el suelo, las nanopartículas pueden no sólo atravesar varias capas y llegar a los acuíferos, sino que los sistemas corrientes de filtrado del agua potable pueden no retener a muchas de ellas. Algunos nanomateriales hidrófobos podrían también formar especies coloidales estables en el agua, aunque no tengan la superficie tratada (Alargova y Tsujii 2001). Por tanto, los posibles riesgos de esas partículas que se mueven libremente en el ambiente son nuevos para la humanidad.

La movilidad de las nanopartículas manufacturadas no se limita al ambiente. A diferencia de otras nanopartículas formadas naturalmente, que son solubles, como las salinas, las manufacturadas no se disuelven al entrar a los pulmones del ser humano. Además, a diferencia de otras nanopartículas originadas como subproductos de los motores y los procesos por combustión, las nanopartículas manufacturadas por diseño no se aglomerarán tanto, por lo que podrían mantener mayor reactividad por períodos más prolongados. Por el contrario, su diminuto tamaño les permitiría entrar al torrente sanguíneo por los pulmones tras la inhalación, al tubo digestivo si son ingeridas e incluso a través de la piel si son en

ella aplicadas o depositadas, como ocurre con las cremas para protección contra el sol ya comercializadas.

También podrían existir nuevas vías de exposición. Se ha demostrado que un tipo específico de nanopartícula penetra al cerebro a través del sistema olfativo. Asimismo, se ha comprobado que una vez en el torrente sanguíneo, las nanopartículas pueden llegar a todos los órganos del cuerpo humano. Así como esta propiedad puede presentar oportunidades únicas para nuevos tratamientos médicos, también presenta posibilidades de una acumulación involuntaria de dichas partículas en el cerebro y en otros tejidos humanos, lo que habla de la necesidad urgente de realizar investigaciones sobre sus posibles efectos adversos.

Asimismo, se ha descubierto que ciertas estructuras tubulares diminutas causan daño por oxidación de las células de piel humana en cultivos (Shvedova *et al.* 2003). Algunos informes han señalado los efectos adversos de ciertos nanotubos de carbono inyectados en los pulmones de ratones. Las respuestas fueron más severas que al cuarzo, un conocido riesgo laboral que se usó como control positivo. Ante la exposición prolongada, se detectó necrosis y deformación por cicatrización del pulmón (Lam *et al.* 2004). Todavía no se han realizado experimentos similares para el caso de otras estructuras nanotubulares y otros materiales que ya están en el mercado. ¿Podría existir un paralelo entre el mecanismo toxicológico de este tipo particular de nanotubo de carbono en los pulmones y el del asbesto o amianto, con base en la naturaleza de la respuesta patológica?

Se desconoce si esos nanotubos en particular plantearán un riesgo para quienes trabajan en su fabricación. La investigación con estudios clínicos controlados y animales, empleando partículas de carbono elemental ultrafinas, reveló gran deposición de las partículas en el tracto respiratorio humano (ICRP 1994). Esas partículas escaparon a la fagocitosis por macrófagos y se trasladaron a otros órganos, aparte de los pulmones. También se observaron efectos cardiovasculares en humanos y animales, así como procesos inflamatorios leves en animales. Otro tipo de partículas similares, administradas por vía intravenosa, pudieron atravesar la barrera hematoencefálica (Kreuter 2001), y se ha sugerido un posible mecanismo de transporte de dichas partículas, de los pulmones a otros tejidos (Oberdöster y Utell 2002).

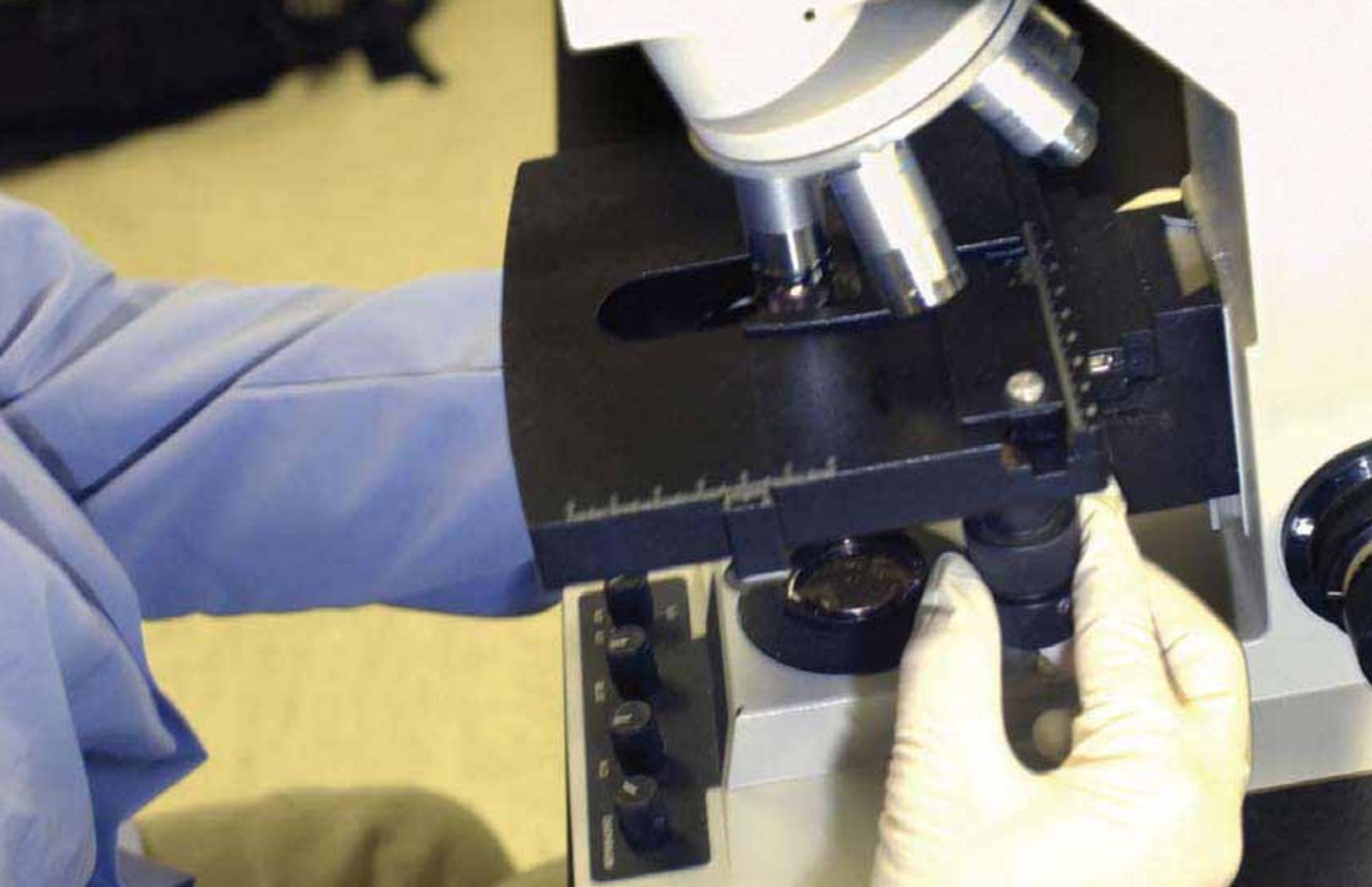
Pero estos estudios no abordaron las distintas posibles formas de exposición humana directa e indirecta a las nanopartículas, ni los destinos y transportes ecológicos o los ciclos vitales ambientales de dichos materiales. Los nanomateriales utilizados en la agricultura y los alimentos podrían ingresar al cuerpo humano por el tracto digestivo, como los contaminantes del agua subterránea. Muy poco se sabe sobre estas cuestiones, pese a que de ellas puede depender el futuro de la propia nanotecnología. Los primeros resultados indican que ciertos tipos de nanopartículas pueden causar exposición por nuevas vías. En el 2004, Oberdöster informó que los *fulerenos* (C60) suspendidos en el agua podrían haber sido directamente transportados al cerebro de los peces por vía de las neuronas olfativas (como se sabe, ocurre con otras



sustancias en pequeños formatos, como las partículas virales) (Oberdöster 2004).

Como indicó Colvin (2003) en un informe sobre el posible efecto ambiental de los nanomateriales producidos por diseño, la nanotecnología está evolucionando y se están comercializando nanomateriales sin ninguna supervisión estatal. Los trabajadores empleados en las plantas de fabricación de nanomateriales probablemente estén exponiéndose a ellos, pero también los trabajadores que usan esos productos, por ejemplo, los que utilizan pinturas para rociadores producidas por nanotecnología o los cosmetólogos que manipulan productos de este origen cotidianamente. Sin embargo, en vista de que las hojas de datos de seguridad de materiales (*MSDS*) correspondientes a los nanomateriales enumeran las mismas propiedades y restricciones para el material a granel, no se menciona ningún requisito adicional o especial como precauciones de seguridad.

El Instituto Nacional de Seguridad Ocupacional y Salud de Estados Unidos (NIOSH) calcula que actualmente pueden estar expuestos hasta dos millones de trabajadores del sector de la nanotecnología en ese país y que, por lo menos, otro millón



► *No puede existir una regulación lógica sin que primero se hayan evaluado los riesgos de estos materiales y técnicas, y son insuficientes los datos que podrían sustentar esa evaluación. Asimismo, no se cuenta con pautas claras para evaluar los riesgos de los nanomateriales; ni siquiera existe acuerdo acerca de una nomenclatura común para esos materiales y técnicas que permita elaborar reglamentos específicos claros para todos los interesados.*

podría quedar expuesto en los próximos diez años. Hasta ahora, la Administración de Seguridad Ocupacional y Salud (OSHA) no ha divulgado directrices para los empleadores (Gruenwald 2004). El NIOSH ha reconocido la falta de información actual sobre los posibles efectos de los nanomateriales para la salud y se ha empeñado, con un grupo interinstitucional de nanotecnología, en la elaboración de directrices para el tratamiento de nanomateriales liberados en el lugar de trabajo. También participará

en la elaboración de directrices OSHA y un grupo de trabajo de la Subcomisión de Ciencia, Ingeniería y Tecnología en Nanoescala (NSET) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Estados Unidos. Además, el Departamento de Defensa de este país financió la creación de un modelo computarizado para prever los efectos tóxicos para la salud y biocompatibles de los nanomateriales, con base en la estructura de las nanopartículas (DoD 2004).

Regulación de la nanotecnología. La necesidad de liderazgo y confianza

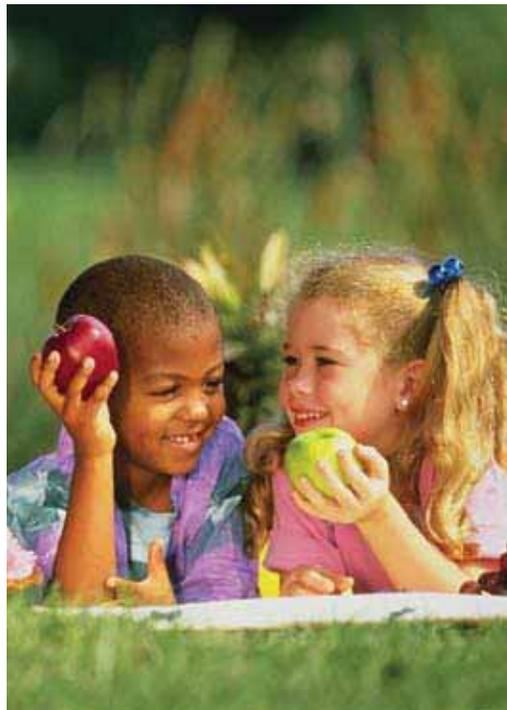
La regulación de la creciente industria nanotecnológica no es sencilla. El campo es muy amplio, por la diversidad tanto de materiales como de aplicaciones. Además, no puede existir una regulación lógica sin que primero se hayan evaluado los riesgos de estos materiales y técnicas, y son insuficientes los datos que podrían sustentar esa evaluación. Asimismo, no se cuenta con pautas claras para evaluar los riesgos de los nanomateriales; ni siquiera existe acuerdo acerca de una nomenclatura común para esos materiales y técnicas que permita elaborar reglamentos específicos claros para todos los interesados.

Dado el enorme alcance de esta tecnología, se ha dicho que “su regulación es un proceso y no un evento”. La aplicabilidad de la Ley de Control de Sustancias Tóxicas de Estados Unidos a los nuevos nanomateriales ha sido materia de debate. Un estudio amplio sobre el tema concluyó que no está claro que esa ley, en su forma actual, permita enfrentar los retos planteados por la creciente industria de la nanotecnología (Bergeson 2006).

Podría argumentarse que se impone aquí el “principio de precaución” y que debería suspenderse el ulterior desarrollo de la nanotecnología hasta comprender mejor los posibles riesgos para los humanos y el ambiente. Pero ese enfoque podría ya no ser práctico y ni siquiera realista, debido a que los elementos fundamentales de la nanotecnología ya son de dominio público. La prohibición sería asimismo devastadora para muchos científicos y empresarios decididamente empeñados en la evolución

de una tecnología realmente promisoría. Sin embargo, también podría discutirse a favor de un criterio de precaución especialmente para los usos dispersivos que pueden causar daños ambientales irreversibles de largo plazo. Si algo aprendimos del pasado, sin duda, es que a largo plazo lo más perjudicial para el progreso económico es un desarrollo insostenible. Será preciso llegar al equilibrio adecuado en las políticas, entre el avance tecnológico en este campo y la prevención de amenazas a largo plazo para la salud y el ambiente.

Por tanto, es esencial que exista un empeño determinado pero también coordinado





► *Por tanto, es esencial que exista un empeño determinado pero también coordinado por conocer y prever los efectos adversos de los nanomateriales para la salud y el ambiente, en el que participen todos los involucrados en este campo –académicos, gobiernos y sector privado– con el fin de evitar la desconfianza del público y un rechazo a la nanotecnología como la que amenazó o por lo menos retrasó la evolución de otras tecnologías nuevas.*

por conocer y prever los efectos adversos de los nanomateriales para la salud y el ambiente, en el que participen todos los involucrados en este campo –académicos, gobiernos y sector privado– con el fin de evitar la desconfianza del público y un rechazo a la nanotecnología como la que amenazó o por lo menos retrasó la evolución de otras tecnologías nuevas. Las autoridades reguladoras deben demostrar preocupación y ofrecer directrices y coordinación, mientras los investigadores logren elaborar un código ético con énfasis en el autocontrol, la cultura y las expectativas (Schultz 2002). Para ello será vital una comunicación adecuada que incluya la divulgación de descubrimientos negativos y positivos para establecer el tipo de confianza pública en la nanotecnología que no existió en la evolución de otras tecnologías.

Conclusiones

La nanotecnología ofrece enormes posibilidades para mejorar la vida humana, pero es limitado el conocimiento acerca de los riesgos de los nanomateriales para la salud humana y el ambiente. No obstante, este campo avanza prácticamente sin ninguna regulación. Por tanto, es necesario adoptar con urgencia algunas medidas para establecer los antecedentes científicos adecuados que permitan estudiar el criterio óptimo para su correspondiente regulación. A continuación se especifican algunas acciones para abordar esta situación, en su orden:

1. Es preciso elaborar y acordar en el nivel mundial un glosario común y armonizado de definiciones y términos específicos de esta nueva tecnología, con el fin de que estandarizar el uso de vocabulario técnico.
2. Se requiere preparar y divulgar normas de referencia para los tipos y tamaños de nanomateriales, de manera que los toxicólogos y demás investigadores tengan acceso a materiales normalizados y elaboren métodos analíticos también normalizados.

3. Es imperioso emprender la investigación de las vías de exposición y los ciclos de vida de los nanomateriales manufacturados para respaldar una evaluación científicamente fundada de sus posibles riesgos para la salud y el ambiente. Además, es necesario diseñar la adecuada metodología de evaluación de los riesgos humanos y ecológicos de los nanomateriales y nanodispositivos, la cual deberá ser armonizada y aceptada en el nivel mundial.
4. Por último, se requiere la participación del público en un proceso de diseño de un criterio razonado y prudente de evaluación y control de los riesgos de la nanotecnología. Deberá realizarse una cuidadosa *comunicación de los riesgos*, en la que participen los gobiernos, los fabricantes, la comunidad médica, los investigadores y el público en general.

Referencias

- Alargova, RG; Tsujii, K. 2001. Stable colloidal dispersions of fullerenes in polar organic solvents. *J A Chem Soc* 123:10460-10467.
- Bergeson, LL. 2006. Toxic Substances Control Act and Engineered Nanoscale Substances. Consultado 12 set. 2007. Disponible en http://www.touchbriefings.com/pdf/1920/Bergeson_tech_proof.pdf.
- Colvin, VL. 2003. The potential environmental impact of engineered nanomaterials. *Nat Biotechnol* 21(10):1166-1170.
- _____. 2004. Research vision – Sustainability for nanotechnology. *The Scientist* 18(16).
- DoD (Department of Defense). 2004. DoD Funds model development to predict nanoparticle effects on living systems. Washington, DC. Consultado 12 set. 2007. Disponible en http://www.nano.gov/html/news/Oberdorster_Article.htm.
- ElAmin, A. 2006. Nanosensor slashes pathogen detection time, inventors claim. *Food Productiondaily.com*. Consultado 12 agosto 2007. Disponible en <http://www.foodproductiondaily.com/news/ng.asp?n=72578-nano-pathogens-sensor>.
- Gruenwald, J. 2004. Researchers discuss safety guidelines for handling nanomaterials. *Smalltimes*. Consultado 12 agosto 2007. Disponible en http://www.smalltimes.com/document_display.cfm?document_id=7922.
- Hett, A. 2004. *Nanotechnology – Small Matter, Many Unknowns*. Zurich, Swiss Re-insurance Company. 43 p.
- ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica). 1994. Modelo del tracto respiratorio humano para la protección radiológica. *Ann ICRP* 24:1-3.
- Joseph, T.; Morrison, M. 2006. *Nanoforum Report: Nanotechnology in Agriculture and Food*. *Nanoforum.org*. Consultado

- 12 mayo 2007. Disponible en <http://www.nanoforum.org/dateien/temp/nanotechnology%20in%20agriculture%20and%20food.pdf?13062007114636>.
- Kreuter, J. 2001. Nanoparticulate systems for brain delivery of drugs. *Adv Drug Delivery* 47:65-81.
- Lam, CW; James, JT; McCluskey, R.; Hunter, RL. 2004. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicol Sci* 77(1):126-34.
- Michelson, E. Undated. Analyzing the European Approach to Nanotechnology. Woodrow Wilson International Center for Scholars, Washington, DC. Disponible en <http://www.environmentalfutures.org/Images/Nanotec1.pdf> [Visitado Accessed 11/22/07.
- NNI (National Nanotechnology Initiative). 2007. (en línea). Disponible en <http://www.nano.gov>
- Oberdöster, G. 2004. Manufactured nanomaterials (fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass. *Environ Health Perspectives* 112(10):1058-1062.
- _____; Utell, MJ. 2002. Ultrafine particles in the urban air: To the respiratory tract—and beyond? *Environ Health Perspectives* 110(8):A440-A441.
- Roach, S. 2006a. Instant, portable, simultaneous pathogen inspection. Food Productiondaily.com Disponible en <http://www.foodproductiondaily.com/news/ng.asp?n=69938-salmonella-nanowires-pathogens> [Visitado 12/8/07.
- _____. 2006b. Nano-herbicide in the works. Nutra Ingredients.com Disponible en <http://www.nutraingredients.com/news/ng.asp?n=70013-nanotechnology-herbicide-toxic> [Visitado 12/8/07
- Schultz, WG. 2002. Nanotechnology under the scope. *Chem & Eng News*, 80(49): 23-24.
- Shvedova, AA.; Castranova, V; Kisin, ER.; Schwegler-Berry, D; Murray, AR.; Gandelman, VZ.; Maynard, A; Baron, P. 2003. Exposure to carbon nanotube material: assessment of nanotube cytotoxicity using human keratinocyte cells. *Toxicol Environ Health Part A* 66(20):1909-1926.
- Thayer, A.M. 2002. Nanotechnology meets market realities. *Chem & Eng News* 80(29):17-19.
- United States Department of Health and Human Services; National Institutes of Health; National Cancer Institute. 2004. Cancer Nanotechnology Plan. Washington, DC. Consultado 12 junio 2007. Disponible en http://nano.cancer.gov/about_alliance/cancer_nanotechnology_plan.pdf]
- Warad, HC.; Dutta, J. 2007. Undated. Nanotechnology for Agriculture and Food Systems – A View. Microelectronics, School of Advanced Technologies, Asian Institute of Technology, Klong Luang, Thailand. Consultado 12 agosto 2007. Disponible en http://www.nano.ait.ac.th/Download/AIT%20Papers/2005/Nanotechnology%20For%20Agriculture%20And%20Food%20Systems%20_%20A%20View.pdf]

Résumé / Resumo / Abstract

► **Bienfaits possibles et menaces de la nanotechnologie pour la santé, les denrées alimentaires, l'agriculture et l'environnement**

La nanotechnologie, champ relativement nouveau de recherche et d'élaboration de matériaux industriels, fondé sur la création de nouvelles classes de structures moléculaires originales, enregistre des progrès rapides qui promettent de changer radicalement ou de toucher de nombreuses sphères du domaine de la science et de la technologie. Elle ouvre également d'innombrables perspectives pour le progrès humain, avec la mise au point de divers types de nanomatériaux qui trouveront des applications dans des traitements médicaux révolutionnaires, dans la recherche agricole et les méthodes d'évaluation de l'innocuité des aliments, dans les procédés de remise en état de l'environnement, dans le domaine énergétique, par exemple pour le revêtement des cellules solaires, de même que dans des produits d'usage quotidien de grande consommation tels que les cosmétiques, les tissus qui repoussent la saleté et la peinture autolavable. Néanmoins, il est essentiel et urgent d'évaluer non seulement les avantages mais également les risques possibles présentés par les nanoparticules et de s'entendre sur des mesures réglementaires efficaces fondées sur des critères appropriés.

► **Oportunidades e ameaças da nanotecnologia para a saúde, os alimentos, a agricultura e o meio ambiente**

Nanotecnologia, um campo relativamente novo de pesquisa e elaboração de materiais industriais com base na criação de novos tipos de estruturas moleculares originais, mostra rápidos avanços que prometem mudar radicalmente ou afetar muitas áreas da ciência e da tecnologia. Além disso, oferece inúmeras possibilidades para o progresso humano mediante a criação de vários tipos de nanomateriais aplicáveis em revolucionários tratamentos médicos, na pesquisa agrícola e em métodos de diagnóstico de inocuidade alimentar, em procedimentos de restauração ambiental e aplicações energéticas, como o revestimento de células solares, inclusive em produtos corriqueiros de grande volume, por exemplo, cosméticos, tecidos repelentes à sujeira e pintura auto-lavável. Não obstante, é essencial e urgente avaliar não apenas os benefícios, mas, também, os possíveis riscos dessas nanopartículas e concordar medidas efetivas mediante critérios reguladores adequados.

► **Opportunities and Threats from Nanotechnology in Health, Food, Agriculture and the Environment**

Nanotechnology, a relatively new field of research and industrial materials development based on the creation of new classes of novel molecular structures, is making rapid advances that promise to radically change or influence many fields of science and technology. The development of various types of nanomaterials for application in revolutionary medical treatments, agricultural research and food safety diagnostic methods, new environmental remediation procedures, energy applications like solar cell coatings, and even high-volume, everyday products such as cosmetics, dirt-repelling fabrics, and self-cleaning paint, offer innumerable possibilities for human progress. However, it is essential and urgent to assess not only the benefits but also the potential risks posed by nanoparticles, and agree on effective measures to prevent such risks through appropriate regulatory approaches.